



TITLE:

Experimental and Theoretical Study on Enhancing Effect of Capillary Evaporation(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Soma, Shu

CITATION:

Soma, Shu. Experimental and Theoretical Study on Enhancing Effect of Capillary Evaporation. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22440>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	相馬 秀
論文題目	Experimental and Theoretical Study on Enhancing Effect of Capillary Evaporation （毛管蒸発の促進効果に関する実験的および理論的研究）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>固気液三相界面に形成される濡れ液膜の蒸発とそれに伴う熱物質輸送は、エネルギー工学、材料学、環境学など幅広い分野において利用される。今日まで、現象の基礎的特性を明らかにするための研究が数多く行われてきたが、狭隘なチャンネル内に形成されるメニスカスでの蒸発に関して、チャンネルサイズが小さいほど蒸発が促進されるという既往の実験結果について、そのメカニズムを十分説明し得る研究は行われてこなかった。本論文は、チャンネル内蒸発促進効果のメカニズム解明に関する研究をまとめたものである。</p> <p>第1章では、本研究の背景と従来の研究に対する本論文の位置づけおよび目的が述べられている。ここでは、毛管長とチャンネルサイズという二つの長さスケールを定義するとともにメニスカスのマルチスケール性を説明し、さらに、既往の理論および実験的研究のレビューを通じて局所蒸発特性に関する基本的性質を、加熱・非加熱の境界条件で区別しつつ纏めている。その中で、蒸気拡散層存在下におけるチャンネル内蒸発促進効果の原因として提唱された従来の解釈が不適当である可能性を指摘して、このメカニズムを解明するためにメニスカスの周長と曲率を支配パラメータとしたモデルによる解析の必要性を述べ、最終的に本論文の流れを説明している。</p> <p>第2章では、メニスカスの曲率が蒸発フラックスに与える影響を定量化するために行った二種類の実験について、その実験方法と結果、および議論が述べられている。両実験に共通して、試験部として矩形ミリチャンネルを用いることで曲率のみをパラメータ化することを可能にしている。蒸発速度の測定方法として、実験容器内の圧力変動から評する間接的方法と電子天秤を使った直接的方法の二つを考案し、実験開始時の履歴に影響されない時間経過後に測定された蒸発速度をチャンネルサイズで除したものを見かけの蒸発フラックスと定義している。矩形チャンネルを構成する試験板としてガラス板を用いた実験では、チャンネルサイズを縮小、すなわち曲率を大きくすることで、見かけの蒸発フラックスが促進される結果を得ている。本実験結果を毛細管で行われた既往実験データと比較することで、この蒸発フラックス促進のチャンネルサイズ依存性が、“周長で蒸発フラックスが決定される”という従来行われてきた解釈では水の方が有機溶媒より蒸発がより促進されるという物理的に矛盾する結果を導くことを明らかにしている。また、試験板としてGe板を用いた実験を行い、蒸発フラックスの曲率依存性を確認するとともに、蒸気拡散層が存在する条件ではチャンネル内表面温度がほぼ等温であることを明らかにした。</p> <p>第3章では、メニスカスの周長が蒸発フラックスに与える影響を定量化するための二種類の実験について、その実験方法と結果、および議論が述べられている。一つ目の実験では、試験部としてガラス製の円管および矩形管を用い、チャンネルサイズをサブ mm から数 10mm オーダーの範囲で変化させ蒸発フラックスのサイズ依存性を調べている。この実験から、チャンネルサイズが毛管長より大きく曲率が一定となる条件</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	相馬 秀
<p>において、周長の減少に伴い蒸発フラックスが緩やかに促進される傾向を明らかにしている。さらに、チャンネルサイズが毛管長以下で曲率がチャンネルサイズに依存する条件下では、周長がおおよそ 10 倍異なる範囲にも関わらず、曲率のみで蒸発速度が整理できることを明らかにし、この条件下では周長は蒸発フラックスに有意な影響を与えないという結論を見出している。二つ目の実験では、試験部としてチャンネルサイズの異なる 4 つのガラスセルを用いて、見かけの蒸発フラックスのチャンネルサイズ依存性を調べている。蒸発促進に関して、チャンネルサイズが毛管長より大きい場合、サイズ依存性は弱く、一方、毛管長以下ではサイズ依存性が強いことを見出し、この章における一つ目の実験結果と整合する結果を得ている。</p> <p>第 4 章では、第 2 章および第 3 章で明らかになった蒸発フラックスの強い曲率依存性に注目し、メニスカス形状に対する蒸発速度のスケーリング則について述べている。既往の液滴蒸発に関するスケーリング則を参考とし、拡散による蒸気輸送のみを考慮したマクロスケールモデルを用いたスケーリング則を新たに導出している。このスケーリング則は、与えられた界面形状における蒸発速度の最大値を与えるものである。このスケーリング則を前章までで得られた実験結果に適用することにより、定性的および定量的に実験結果を再現できることを明らかにし、その妥当性を示している。また、有機溶媒を用いた従来の毛細管実験データに適用した場合にも定性的に再現できることを確認している。</p> <p>第 5 章では、従来の研究で説明することができなかった曲率による蒸発フラックスのサイズ依存性のメカニズムの解明を目的とし、数理モデルを用いた考察を展開している。具体的には、蒸発のポテンシャル差がサイズ依存性を有する可能性に注目し、ミクロスケールの液膜領域における局所蒸発特性をモデル化しその妥当性に関して議論している。モデル化の前提条件として、従来の一成分モデルが蒸気拡散層存在下において適用不可能であるため、まず、ターゲットとするミクロ長さスケールを自由エネルギーが最小となるように記述し、既往のデータと接触線近傍において一致することを確認している。この長さスケールを用い、蒸発に伴う薄膜潤滑、液膜熱伝導、気体分子運動論的輸送、蒸気拡散からなる熱物質輸送現象を定式化している。得られた式では、従来の流体力学的圧力項とバランスする過剰蒸気圧力を導入することで、非平衡駆動力項がチャンネルサイズ依存性を有すること、および、第 4 章で示したスケーリング則と等価な式が得られることを明らかにしている。さらに、チャンネルサイズが毛管長より大きい場合に測定された蒸発フラックスの挙動も本モデルの外挿結果から説明可能であることを示している。</p> <p>第 6 章は総括結論であり、界面の曲率半径および周長という二つの長さスケールが蒸発促進に与える影響を実験および理論的に評価して得られた、蒸発促進がチャンネルサイズが毛管長より小さい場合は曲率に強く依存し、逆に毛管長がチャンネルサイズよりも小さい場合は全界面面積と接触面積の比に依存するという知見が、相変化熱交換器性能向上や濡れ性制御といった工学装置等に応用展開可能であることを示唆している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、蒸気拡散層が存在する条件におけるチャンネル内メニスカス蒸発促進効果のメカニズムの解明を目的として、界面の曲率半径および周長という二つの長さスケールを支配パラメータに選択した実験結果、およびマクロ・マイクロモデルによる蒸発のサイズ依存性とそのメカニズムの考察を実施した結果について、その成果を纏めたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 矩形チャンネルを用いてメニスカス曲率のみをパラメータ化する蒸発実験を実施し、見かけの蒸発フラックスが曲率に対して線形に増加する依存性を明らかにした。
2. 円形および矩形チャンネルを用いてメニスカス周長をパラメータ化する蒸発実験を実施し、チャンネルサイズと毛管長の大小関係によって、見かけと面積平均蒸発フラックスのチャンネルサイズ依存性が変化することを見出した。毛管長より大きい場合、周長による緩やかなサイズ依存性を、毛管長以下では曲率による強いサイズ依存性を見出している。
3. 蒸発フラックスの曲率依存性に注目し、蒸気拡散による物質輸送のみを考慮したマクロスケールモデルを用いて、蒸発速度のサイズ依存性を記述するスケーリング則を導出した結果、本研究の実験データを定性的および定量的に再現できることを明らかにした。
4. ポテンシャル差がサイズ依存性を有するという仮説を提起し、自由エネルギーを最小化するように定量化されたマイクロ長さスケールをキーパラメータとして定式化された液膜領域での熱物質輸送式において、従来の流体力学的な圧力項とバランスする過剰蒸気圧力を導入した。その結果、蒸気拡散層が存在する場合、局所蒸発フラックスがマクロな液膜領域で最大となること、およびその最大値が本研究で求められたスケーリング則と等価となることを明らかにし、曲率および周長依存性が非平衡効果として解釈できることを示した。

以上のように、本論文では、界面の曲率半径および周長という二つの長さスケールが蒸発現象に与える影響を実験的に評価し、マクロスケールおよびマイクロスケールなモデルを用いて毛管蒸発のサイズ依存性のメカニズム解明にアプローチした結果を纏めたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。また、本研究の工学応用への展開に関する提言も行っている。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年2月12日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 2020年 2月 22日以降